

# 鋼の降伏に関する研究

遠 藤 信，熊 倉 重 典，西 野 知 良

工 学 部 機 械 工 学 科

## § 1. 緒 言

炭素鋼の降伏に関する研究は従来幾多行われて居り殊に最近は転位論の立場からこの現象を説明せんとする傾向にある。Cottrell<sup>1)</sup> は溶質原子の周りの転位の応力による移動によつて説明しているが単結晶にこの現象の現われ離いのを説明出来ない欠点がある。Holden<sup>2)</sup> はこの欠点を補うべく転位の平均自由行路の概念を入れて結晶粒界現象にも言及している。

この現象が炭素鋼の熱処理又は他元素の添加等により出現又は消滅することは応力による内部相の変化に基づくことが予想される。元素これは炭素鋼独自の現象であり転位論の如き一般的理論では説明出来ない現象が多々ある。

真鍮その他銅合金に認められる加工後の所謂異状硬化現象と同様の現象が炭素鋼にもあり歪時効硬化と云われているがもしこの硬化が Fe-C, Fe-N 系の鉄側溶解限の加工による変化に原因しているとせば、歪時効に関係する降伏現象も相変化に由来していると考えられる。

Schwarzburt,<sup>3)</sup> Palm<sup>4)</sup> 及び Gensamer<sup>5)</sup> 等は降伏現象を鋼中の炭素及び窒素に基づくと報告して居り、Liu<sup>6)</sup> は降伏現象は辻り面への溶質原子の析出であると云つて居るが、しかし析出現象に基づくすると全ての現象を説明することは出来ない。即ち加工後の時効により硬化し降伏現象の再現するのは析出或いは析出類似の現象の重複になり起り得ないことである。又Kuntze<sup>7)</sup> はジュラルミンを焼入後時効させた場合だけこの現象の認められることを報告して居り降伏現象を析出に基づくと説くは当たらない。

著者等は応力によつて溶体化現象が起るのではないかと考え、もし溶体化すれば吸熱変化の起ることに着目し降伏点附近に於ける熱変化の状態を各種炭素鋼について検討し、熱処理条件との関係を求めたがその結果について報告する。

## § 2. 試 験 條 件

(A) 丸棒試験片を使用し、つかみの部分にねぢを切つて球形座掴みにねぢ込んで引張り応力の均一化をはかつた。

(B) 試験片の分析成分

純鉄はフローゲン鉄、各炭素鋼はスウェーデン鋼、銅は市販のものをを用いたがその分析成分は次表に示す如くである。

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	フローデン鉄
C	0.11	0.34	0.50	0.92	0.02
Mn	0.40	0.45	0.45	0.25	0.02
Si	0.27	0.28	0.24	0.27	0.01
P	0.014	0.021	0.025	0.024	0.005
S	0.026	0.020	0.026	0.035	0.02

## (C) 引張試験

アムスラー 5 ton 引張試験機を用い一定歪速度で引張つた。試験片の中央部にアルメル-クロメル熱電対をハンダ付けし弾動電流計(感度約  $40\text{mm}/^\circ\text{C}$ )に接続して熱変化を測定した。試験片周辺の空気の対流に基づく熱のフレを除く為に試験片を箱でおおつた。以下述べる熱変化は厳密な意味の熱変化ではなく、試験機及び空気中に逃散する熱は大きく、あく迄も相対的な値を示すにすぎない。引張りは100~150秒に0.1%伸びる程度の速度で行つた。

## § 3. 試験結果

## (A) 焼鈍材の熱変化

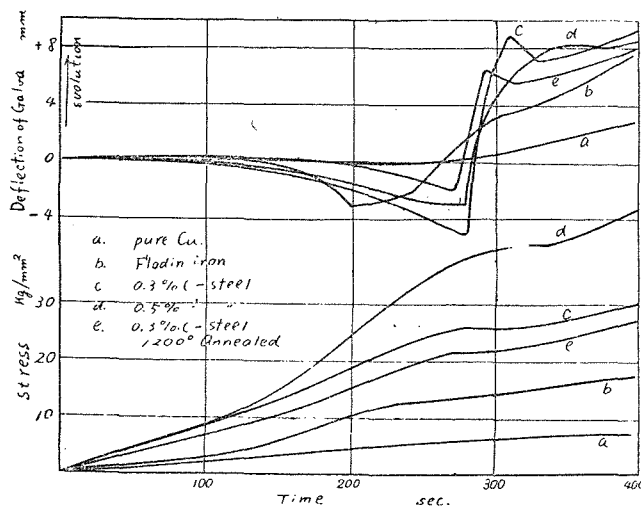


Fig. 1. Time-stress and Time-Thermal change Curves, of annealed Copper, Iron and Carbon steel.

Fig. 1 は焼鈍材の応力一時間及び熱変化一時間曲線である。図中 (a) は Cu のそれで降伏点はなく熱変化も単調で塑性変形の進行するにつれて発熱しているのが認められる。Cu は熱伝導度良好なる爲熱の外部に逃散する速度も早く温度変化は少ないものと思われる。純鉄は (b) に示すように僅かではあるが降伏現象が認められ、熱変化は降伏後に急激な熱上昇と降伏前に僅かの吸熱変化とが認められる。(c) 及び (d) は

夫々 0.34% 及び 0.5% C 鋼のそれであるが炭素量の増加と共に降伏点は上昇するが降伏に要する時間は減少し、0.9% C 鋼では  $50\text{kg}/\text{mm}^2$  附近に僅かに認められるに過ぎない。

これは炭素の増加につれパーライトの増加を表し降伏現象の主原因であるフェライト地の減少する爲と思われる。

熱変化は図上部に示すように降伏の始まると共に著しい発熱変化を示す。発熱量は 0.9% C 鋼を除いて略同様であり純鉄に比し著しく大である。この発熱量と鋼中の炭素量との関

係を図示すると Fig. 2 のようになる。

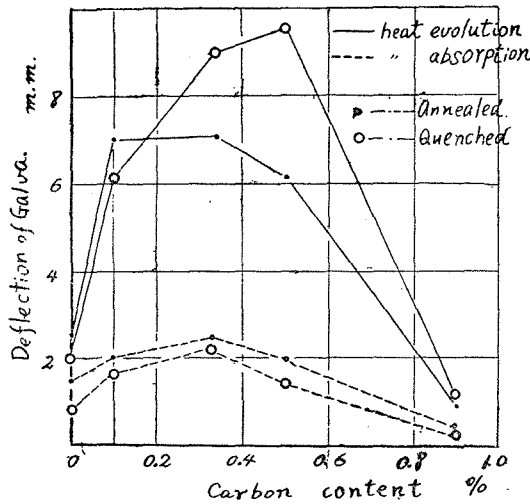


Fig. 2 Relation between carbon content and the amount of thermal change of carbon steel, annealed and water quenched from 580°C.

0.1%~0.5% C 含有量に max. を有し純鉄及び0.9% C 鋼では少い。この発熱の原因は主として格子面の切り、即ち Lüders line の発生による摩擦熱であるが、降伏の部分が塑性範囲の加工の場合の切りの発生速度に比し大なる爲であろう。この発熱は短時間内に行われるが降伏区間の長い試験片（ここに示していないが0.1% C 鋼の場合）についてみると最初の熱発生速度も大であるが、その後不連続変形と同様熱変化も不連続的であり熱の上昇部は切りにより起るが下降部に於ては切りは行われず自然の放熱で温度降下を来すものと思われる。即ち切りは断続的に起ることが分る。降伏後は塑性変形の進行と共に漸進的に発熱を起す。

降伏の始まる前に吸熱変化を示す。この吸熱量は炭素量によつて異なり、Fig. 2 に点線で示すように0.34% C 鋼に max. を有し、炭素の増減と共に吸熱量を減じている。純鋼に於ては吸熱変化を示すことは有り得ないことである。図に示すように炭素量によつて吸熱量が異り降伏の際の熱上昇と同様の傾向にあることは吸熱変化が降伏現象に関係していることを示す。

Tammann<sup>9)</sup> は Cu, Ni 及び Fe について弾性範囲の熱変化を測定し吸熱変化のあることを指摘して居り、この変化を弾性膨脹による断熱変化に基づくとしているが、本実験の場合も吸熱変化が Tammann の指摘した通りであるとすれば降伏現象には無関係であるが、このことに関しては Fig. 3 に示すような実験を試みた。

即ち加工後直ちに引張つた場合一般に応力の不連続現象を伴う降伏現象は認められないがその降伏現象のない場合の熱変化を測定してみた。(a) は0.34% C 鋼

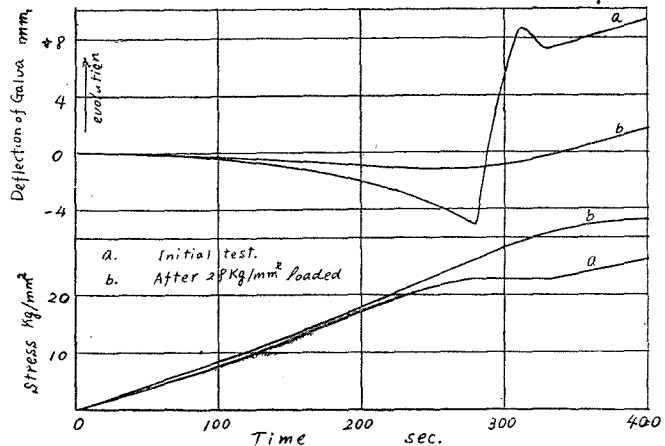


Fig. 3 Effect of yielding on the endothermic change in the region of elasticity.

の焼鈍のままの応力-時間、熱変化-時間曲線であるが (b) は (a) 測定後荷重をとり弾動電流計のフレの落着くのをみはからつて後直ちに測定した結果であるが、(a) と著しく異なる熱変化を示す。即ち降伏点に於ける熱上昇もなく吸熱変化も (a) に比し著しく小である。Tammann の説くように吸熱作用は弾性範囲に認められるが降伏現象を有する場合は更に著しいことが判る。そしてこの吸熱変化は比例限をこえた頃から特に著しい。

(B) 400~600° から焼入れた場合及び焼戻した場合の熱変化

0.34% C 鋼を主にして述べると470°以上の高温から焼入れた場合は引張試験の自記装置には殆ど降伏現象は現われないが470°以下から焼入れた場合はなくなる。この臨界点が約470°にあるが、このことに関しては焼入歪の多少をもつて論ずるはあたらない。むしろ Fe-N 系の鉄側溶解限の変化に基づいているものと思われる。降伏点に於ける発熱量は Fig. 2 に示すように焼鈍のままよりも大であり 0.34% 及び 0.50% C 鋼では殊に著しい。吸熱変化は焼鈍の場合より幾分小になつてゐる。

降伏点以上の荷重を与えて後数日間常温時効して後引張ると降伏点は上昇し不連続現象の再現することは周知の事実であるが焼入後低温に時効した場合にも同様の現象が認められる。Fig. 4 は580°から水焼入した後100~600°に30分焼戻した場合の応力-時間、熱変化-時間曲線である。

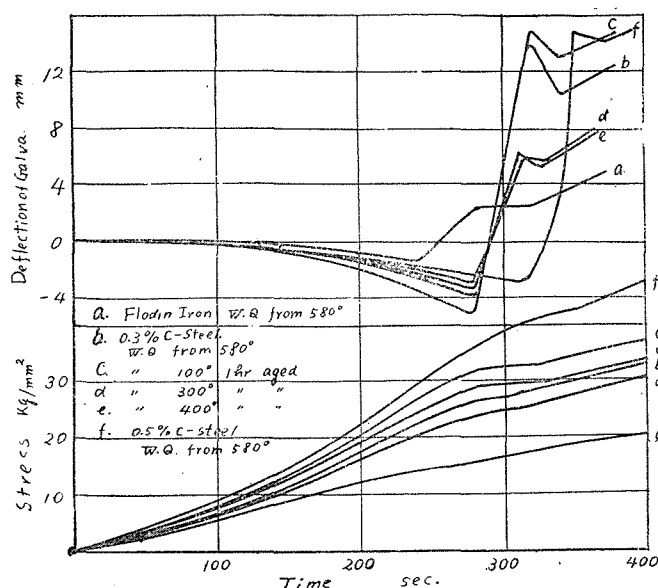


Fig. 4 Time-Stress and Time-Thermal change

Curves of Tempered Carbon steel.

高温になるに従い、降伏現象は不明瞭になり400°以上の高温焼戻では再び明瞭になる。焼戻の場合の熱変化は吸熱及び発熱変化何れも認められるが、各焼戻温度との関係は Fig. 5 に示すようになる。

降伏点及び熱変化量何れも300°に min. を有する。100°焼戻で降伏点の上昇するのは時効硬化を示し、焼戻温度の上昇と共に降下するのは cluster の成長に伴う軟化を意味し、300°の min. は cluster の溶体化にもとづくもので安定化合物の析出する以前の段階に

図中 (a) は、フローデン鉄の焼入のままのもので降伏現象は殆ど認められず、熱変化も焼鈍のままのものに比し小である。(b) は 0.34% C 鋼の焼入のままのもので降伏に要する時間も著しく短くなつてゐる。(c), (d) 及び (e) は各々 100°, 300° 及び 400° に焼戻した場合のそれで、100° 焼戻の場合は降伏点も上昇し不連続現象も明瞭である 100° 焼戻の場合は10秒位の短時間焼戻でも認められ常温時効に比較して降伏の発生に要する時効時間は著しく短かい。200°, 300° と

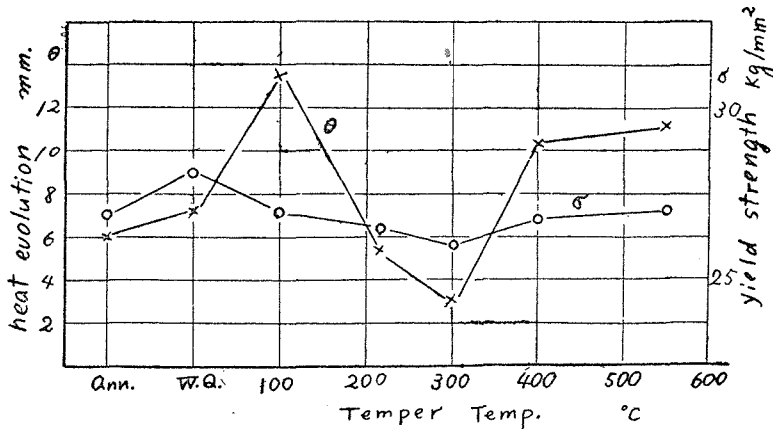


Fig. 5 Relation between tempering Temperature and yield point, the amount of thermal change

の本性は不明であるが窒素の鉄に対する溶解限を考慮して580°から焼入れたのであるから、降伏現象は窒素に関係して居り、低温焼戻の際生ずる cluster と高温焼戻及び焼鈍の際生ずる安定化合物の二種が降伏に関係していることが分る。常温時効の場合の所謂歪時効硬化は焼戻温度の低い場合にすぎない。

#### (C) 高温焼鈍の降伏に及ぼす影響

従来は単結晶の場合は降伏現象は認められないといわれて来たが Schwarzburt<sup>3)</sup> は単結晶でも滲炭又は窒化した場合には認められると報告している。1,200°に3時間焼鈍して平均1~2 mm 直径の大きさの結晶粒にした0.34% C鋼について検討してみると Fig. 1 の(e) に示すように降伏現象は不明瞭になり熱変化も他に比較して小である。又ここには示さなかつたが結晶を成長させた後580°から水焼入すると降伏点に於ける発熱は著しく、低温で焼鈍した同炭素鋼を水焼入した場合よりも大になる。

#### (D) 引張り加工の際の硬度変化

応力-歪状態図の曲線に沿つて0.34% C鋼を引張り加工した後荷重を除いて硬度変化を測定すると Fig. 6 に示すように降伏点前に於て僅かではあるが軟化を示す。

降伏後は荷重と共に硬度を増すが降伏前及び上部降伏点に於て軟化するのは明かに材料内部に歪を緩和させるような変化の行われていることを示すものである。

#### § 4. 実験結果に対する考察

以上の実験結果を総合すると降伏点以

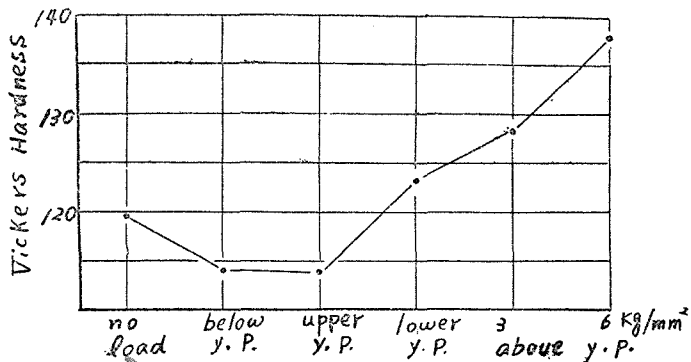


Fig. 6 Relation between stress and Hardness of annealed 0.34% Carbon steel.

相当する。即ち300°で降伏現象の不明瞭になるのはこのためで、応力によつて溶体化すべき粒子がなく焼入直後の状態にもどるからである。この時効硬化及び溶体化の現象

下で Tammann の唱える弾性範囲内の断熱膨脹にもとづくより以上大きい吸熱変化を示し、併せて軟化の起きていることが判る。この二つの事実は Al 合金等を焼入れて時効後時効温度より高温に短時間加熱すると軟化する、所謂復元現象に類似している。即ち鋼中の炭素及び窒素の或る形体が応力の刺激を受けて溶体化するという機構で降伏現象は説明出来る。これは著者の一人<sup>9)</sup> が Al-Cu 合金で常温時効後加工すると復元温度は少々低下し、溶体化は促進されると報告したが、これと類似のことが降伏現象についてもいえるのである。

#### (A) 降伏の機構

引張り加工を行うと弾性範囲内でも炭素及び窒素の或る化合物の溶体化は起り降伏点後に於て著しくなる。これは塑性範囲でも起つていると思われる。その結果軟化を起しフックの法則に従わなくなつて歪の増加が著しくなる。これの巨視的に現われたのが弾性限から降伏点迄の曲りである。この溶体化がある限界迄進行すると試験片の強さは極度に減少して延びる。この場合溶体化は格子欠陥の多い結晶粒界に著しく、粒界は軟化する。かくして粒界と粒内の強度が等しくなるに及んで Lüders line の発生を見る。この結果は強度は増加し、しかして応力は増加する。この時期が各粒界によつて異なれば応力-歪曲線に見られる不連続変形が認められる。ために降伏現象の認められる場合は軟化を伴うから、もし同一材料で降伏現象の現われないと仮定した場合に比較して、同一応力に対して歪は大である。これを図示すれば Fig. 7 に示したようになる。

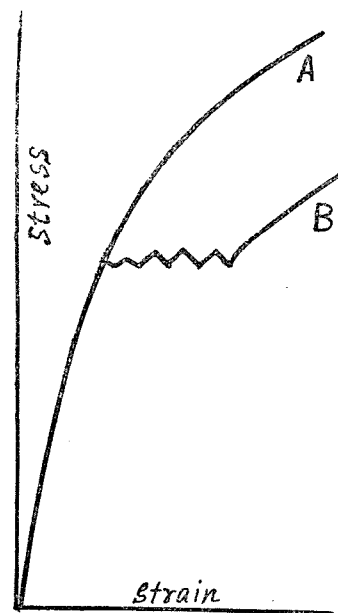


Fig. 7 A model of stress-strain diagram affected by yielding phenomena

図に示す (A) は降伏現象がないと仮定した場合の状態図であり、(B) は実際の状態図であり、この軟化は塑性範囲に於ても起つていると思われる。このことに関してはフローデン鉄を数回試験した結果、降伏現象の比較的明瞭に現われる場合と然らざる場合とあり下表に示すように明瞭の場合の降伏点は比較的小である。

応力時一問曲線上の降伏に要した時間 (sec)	15	15	40	40
降 伏 点 kg/mm <sup>2</sup>	13.7	13.0	11.7	11.3

これは勿論両者の材質が完全に同一で降伏の時間の長短だけ異るとした場合の比較で、他の因子をも考慮に入れなければいけないが大凡の傾向は判る。

焼鈍材の場合と焼入後焼戻した場合の溶体化すべき粒子の内容の差異は不明であるが、低温焼戻の場合は cluster であるが高温焼戻及び焼鈍した場合は安定系の化合物であり、時効硬化性合金の例をみても、これが溶体化の能力をもつていとは考えられない。格子欠陥の多いフェライト粒界には安定系化合物の他に cluster にも似た不安定系化合物の存在することが考えられ、これが降伏現象にあづかつていと思われる。これは結晶を成長させた試験片では溶体化を起させる粒界の格子欠陥数が減少し格子欠陥

部にだけ生ずる不安定系化合物の数が少くなる爲に吸熱量が少くなり降伏現象も不明瞭になつて来る。粒界内に於ける溶体化は全然行われぬのではなく矢張り格子欠陥部に於ては行われる。

### (B) 実験結果の考察

この溶体化の見地から実験結果について考察してみる。

#### (イ) 降伏の際の熱変化

580°から水焼入した場合降伏点に於ける発熱変化の著しいのは焼入によつて窒素がフェライト中に過飽和に固溶している爲に粒界及び粒内の強度差少く、Lüders line の発生が短時間内に行われる爲である。結晶粒大なる場合は、粒界の格子欠陥が少い爲に炭素及び窒素は大部分安定な化合物を形成して居り、応力により溶体化する粒子が少い爲に Lüders line の発生は少い。

#### (ロ) 歪時効硬化

引張過程中には弾性及び塑性、何れの変形の場合も応力により炭素及び窒素の或る形体は溶体化して居り、加工度の量が大になれば溶体化の量も増加する。加工後応力を除去して時効すると応力下で不安定な粒子も応力除去後は安定化して析出し始める。これが歪時効硬化であり、再び加工すると新に析出した粒子は溶体化し降伏の不連続現象を起す。ジュラルミンを時効硬化した場合にもこの現象の認められるのは cluster が熱的に不安定であるばかりでなく応力的にも不安定で容易に溶体化する爲である。

著者の一人<sup>10)</sup>は先に銅合金の異常硬化を研究し、加工後低温に時効すると硬化し、時効後時効温度より80~100°高温に短時間加熱すると軟化し時効性 Al 合金に見られると同様の復元現象を有することを発表した。炭素鋼もこの現象を有し常温時効後200°に1分加熱すると軟化し、加工直後の硬度に戻る。

### § 5. 結 論

炭素鋼の引張加工中の熱変化を測定し、その熱変化が炭素濃度及び種々熱処理によつて変化することを確かめ、この熱変化と硬度変化から降伏現象の機構を不安定粒子の応力による溶体化によつて説明することが出来る。即ち降伏前に吸熱変化を起すが、これは Tammann の唱える弾性膨脹にもとづく断熱変化より以上大きく、又殊に降伏前後に於て軟化することは時効性 Al 合金にみられる現象に類似して居り、炭素の不安定粒子の応力による溶体化とみることが出来る。この溶体化はフェライトの結晶粒界又は他の格子欠陥部で多く行われ、溶体化によつて軟化し格子欠陥部と完全格子との強度が等しくなり Lüders line を発生して硬化し応力は増加する。かくして応力—歪曲線の不連続部を生ずる。歪時効硬化もこの溶体化した粒子が応力除去後安定化して析出する事により起る。

### 参 考 文 献

- (1) Cottrell : Phys. Soc. London (1948) P. 30
- (2) Holden : J. Metal (1952) Feb. 182
- (3) Schwarzburt : J. Metal (1949) Sept 637
- (4) Palm : Rev. de Metall. (1950) Jan. 7
- (5) Gensamer : Metal. Techn. 5 (1938) No. 894
- (6) Liu : J. Ir & St. Inst. 147 (1943) 145

- (7) Kuntze : Z. Metallk. 26 (1934) 106
- (8) Tammann : // // 29 (1937) 84
- (9) 西 野 : 山形大學紀要(工学)(1951) 第2号
- (10) 遠藤, 西野 : 日本金属学会昭和27年春講演

## STUDY ON THE YIELDING OF STEEL

M. ENDOH , S. KUMAKURA, K. NISHINO

Mech. Eng. Department, Faculty of Engineering

### Résumé

The mechanism of yielding phenomena in carbon steel has been recently considered from the standpoint of dislocation theory, but these phenomena peculiar to carbon steel can not be explained satisfactorily by this theory alone.

These phenomena are affected by the change of phase which occurs by various heat treatments and the addition of other elements.

We measured the thermal change of carbon steel in its tensile test. As a result, endothermic change appeared below the yield point and exothermic change on the yield point. The amount of this endothermic change is as much greater than that which is due to the elastic deformation measured by Tammann.

The endothermic change is caused by the dissolution of the compounds of carbon and nitrogen in the part of lattice defects into matrix, and then the specimen softens as the effect of this change.

Lüders line appears when the strength of the part of lattice defects become to be identical with that of complete lattice, and then hardness increases according to the occurrence of slip.

Strain ageing occurs owing to reprecipitation of the particles by ageing after removing stress.